有氧运动对不同血糖水平男性人群动脉僵硬度的即时影响

何荣，张丽，李鹏，等. 有氧运动对不同血糖水平男性人群动脉僵硬度的即时影响［J］. 中国全科医学，2023. ［Epub ahead of print］. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0029

何荣[1,2]，张丽[1]，李鹏[1]，张晓玲[1]，张国[1]，臧懿然[2]，吴寿岭[3]，孙丽霞[1]

1.063000 河北省唐山市，华北理工大学附属医院急诊科

2.063200 河北省唐山市，华北理工大学研究生学院

3.063000 河北省唐山市，开滦总医院心内科

*通信作者：孙丽霞，教授，硕士生导师；E-mail:13323151999@189.cn

【摘要】 **目的** 探究有氧运动对不同血糖水平人群动脉僵硬度的即时影响。**方法** 本研究以既参加开滦研究 2018-2020 年第 6 次随访体检又完成功率车二级负荷试验前后臂踝脉搏波传导速度（baPWV）测量者为研究对象。根据空腹血糖水平将观察对象按照四分位分组：Q1（*n*=220）：<5.00 mmol/L、Q2（*n*=240）：5.00~<5.40 mmol/L、Q3（*n*=230）：5.40~<5.81 mmol/L、Q4（*n*=234）：≥5.81 mmol/L。采用广义线性模型，分析不同血糖水平组功率车二级负荷试验前后 baPWV 的变化差异。**结果** 符合纳入标准的观察对象 924 人，年龄（36.93±7.72）岁。功率车二级负荷试验 7min 后即时测得的 baPWV 下降，较静息水平平均下降了 36cm/s。校正相关混杂因素后，发现与空腹血糖水平最高四分位（Q4）组相比，空腹血糖水平最低四分位（Q1）组 baPWV 下降 18.96（95%*CI* -36.96,-0.96）cm/s。**结论** 有氧运动能即时改善动脉僵硬的程度，但高血糖减弱了有氧运动改善动脉僵硬度的作用，而且这种不利的作用独立于体质量指数（body mass index,BMI）、高血压等传统心血管疾病危险因素。

【关键词】 脉搏波传导速度；有氧运动；血糖；动脉僵硬度；心血管疾病

The immediate effects of aerobic exercise on arterial stiffness in a male population with different blood glucose levels

HE Rong[1,2], ZHANG Li[1], LI Peng[1], ZHANG Xiao-ling[1], ZHANG Guo[1], ZANG Yi-ran[2],WU Shou-ling[3], SUN Li-xia[1]

1.Department of Emergency, Affiliated Hospital of North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063000, China;

2. Graduate School of North China University of Science and Technology;Tangshan, Hebei 063200, China;

3. Department of Cardiology, Kailuan General Hospital;Tangshan, Hebei 063000, China;

*Corresponding author;SUN Li-xia,Professor,Master supervisor;E-mail:13323151999@189.cn

【**Abstract**】 **Objective** To investigate the immediate effect of aerobic exercise on arterial stiffness in people with different blood glucose levels. **Methods** Those who participated in the sixth follow-up physical examination of the Kailuan Study from 2018 to 2020 and completed the brache-ankle Pulse Wave Velocity (baPWV) measurement before and after the secondary load test of the power vehicle were included in this study. According to fasting blood glucose levels, the observed subjects were grouped into quartile: Q1 (*n*=220) : FBG <5.00mmol/L,Q2 (*n*=240) : 5.00mmol/L≤ FBG <5.40mmol/L,Q3 (*n*=230) : 5.40mmol/L≤ FBG <5.81mmol/L,Q4 (*n*=234) : 5.81mmol/L≤ FBG .A generalized linear model was used to analyze the changes of baPWV before and after the secondary load test of power vehicle with different blood glucose levels. **Results** A total of 924 subjects met the inclusion criteria [age (36.93±7.72) years]. The baPWV measured immediately after 7 minutes of power vehicle secondary load test decreased by an average of 36cm/s from the resting level. After adjusting for confounding factors, baPWV decreased by 18.96[95%CI: -36.96,-0.96]（cm/s）more in the group with the lowest fasting glucose (Q1) than in the group with the highest fasting glucose (Q4). **Conclusion** Aerobic exercise can immediately improve the degree of arterial stiffness, but hyperglycemia attenuates the effect of aerobic exercise. This adverse effect was independent of traditional cardiovascular risk factors such as BMI and hypertension.

【**Key words**】 Pulse wave velocity; Aerobic exercise; Fasting blood glucose; Arterial stiffness;Cardiovascular disease

有氧运动是预防和治疗慢性非传染性疾病的基石[1-4]。长期有规律的有氧运动不仅可以减轻体重[5]，降低血糖[6]，改善脂代谢[7]，还可以预防动脉粥样硬化和动脉硬化，进而预防心脑血管疾病[8]。即便在心脑血管疾病的二级预防中[9]，有氧运动也有举足轻重的地位。因而，各种指南均将有氧运动作为健康生活方式的主要推荐。

以往有氧运动获益的研究主要关注的是有氧运动对长期的心血管健康及结局的影响[10-13]。即便有对短期或即时影响的研究也是以关注有氧运动对血压影响的研究为主，仅有少数小样本的研究观察了有氧运动对动脉僵硬度的影响，结论也不一致。Kobayashi 等[14]以 11 名健康男性青年人群为观察对象的研究发现有氧运动后即时动脉僵硬度明显改善。另一项研究以 24 名青年糖尿病人群为观察对象发现有氧运动后即时动脉僵硬度无明显改善[15]。因为高血糖是增加动脉僵硬度的因素[16-19]，因而推测高血糖可能削弱有氧运动改善动脉硬化的作用。为了验证这一假设，本研究利用开滦研究（注册号：ChiCTR-TNC-11001489）资料，并结合 2020 年第五次国民体质监测数据，分析了有氧运动对不同血糖水平人群动脉僵硬度，即臂踝动脉脉搏波传导速度（brache-ankle Pulse Wave Velocity，baPWV）的即时影响。

1 对象与方法

1.1 研究对象

开滦研究(注册号:ChiCTR-TNC-11001489) 是一项基于功能社区人群的心血管病危险因素的调查及干预研究。始自 2006 年 7 月，由开滦总医院以及所属 10 家医院负责对开滦集团在职及退休人员进行健康体检，此后每 2 年进行一次随访。为系统掌握国民体质状况、增强国民体质的相关政策提供依据，2020 年国家体育总局在全国开展了第五次国民体质监测。以行业为抽样单元，根据煤炭行业典型工种分布特点，随机抽取了开滦集团四个所属企业 1200 名 20-49 岁男性职工作为样本人群。其中，检测内容包括功率车二级负荷试验、坐位体前屈、心肺耐力测试、体脂率等。在原测量内容的基础上，本研究在功率车二级负荷试验前后增加了 baPWV 测量。本研究以既参加了开滦研究 2018-2020 年第六次随访体检又完成功率车二级负荷试验前后 baPWV 测量者为研究对象。

1.2 纳入与排除标准

纳入标准:(1)参加开滦集团 2018-2020 年第六次随访体检且被抽取参加 2020 年第五次国民体质监测者；（2）在功率车二级负荷试验前后各完成一次 baPWV 测量者；(3)同意参加本研究并签署知情同意书者；

排除标准:(1)空腹血糖资料缺失者；(2)功率车二级负荷试验数据不完整者。本研究遵循赫尔辛基宣言，研究获得开滦总医院伦理委员会(伦理审批号：[2006]伦理字 5 号)批准，入选者均签署了知情同意书。

1.3 资料收集

1.3.1 流行病学调查内容：包括年龄，性别，高血压、血脂异常病史服药史，吸烟史，饮酒习惯，体育锻炼等一般情况。人体测量学指标包括身高,体重,收缩压、舒张压、心率等。生化指标检测包括三酰甘油、总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇(High-density lipoprotein cholesterol，HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(Low-density lipoprotein cholesterol，LDL-C)、高敏 C 反应蛋白（high-sensitivity C-reactive protein，hs-CRP）等。具体方法详见本课题组已发表的文献[20-21]。

1.3.2 空腹血糖检测：受检者至少空腹 8h,于体检当日晨起 7:00-9:00 时抽取空腹肘静脉血 5ml 用于检测,在室温 24℃下，经过 3000r/min 离心(离心机半径 13cm)10min 后，取上层血清,在 4h 之内检测空腹血糖。采用已糖激酶法检测，变异系数在 5.6mmol/L 不超过 2%,线性上限是 33.3mmol/L，用日立 7600 自动生化分析仪进行检测,试剂盒由中生北控生物科技股份公司提供。由专业检验师严格按操作手册进行，随批质控。

1.3.3 功率车二级负荷试验：所有检查均在室温为 22-25℃的现场进行。采用国民体质监

测中心统一配套的 GMCS-GLC3 型功率车（天津市星河众邦工程咨询有限公司生产）进行功率车二级负荷运动试验，所有观察对象在功率车运动前 12h 内禁止吸烟、饮酒、摄取咖啡因及剧烈活动。功率车二级负荷试验开始前所有观察对象休息 15min 以上后测量静息血压、心率、baPWV。随后所有观察对象在功率车上进行二级负荷试验，全程维持 7 分钟，整个运动过程观察对象始终以 60 转/min 的转速蹬踏功率车。初始 30s 为零负荷热身阶段，每 3 分钟增加一个负荷等级（25w），共增 2 次，最后 30s 为零负荷恢复阶段。运动心率由佩戴在右上臂中点内侧的心率仪进行实时监测，最大摄氧量（maximum Peak oxygen consumption，VO_2max）由功率车自带系统计算并上传。

1.3.4baPWV、血压、心率的测量：baPWV 测量使用欧姆龙健康医疗(中国)有限公司生产的 BP-203RPEIII网络化动脉硬化检测装置在观察对象功率车二级负荷试验前后分别接受 baPWV、血压、心率的测量。测量时，所有观察对象穿薄衣，去枕平卧于测量床上，双手手心置上置于身体两侧，保持安静。医务人员将上臂袖带气囊标志处对准肱动脉，下肢袖带气囊标志位于踝关节内侧，将心电采集装置夹在两侧手腕。对每位观察对象重复测量 2 次，取第 2 次数据为最后结果。本研究取左、右两侧 baPWV 中的较大值进行分析。血压取右上肢的值进行分析。根据收缩压和舒张压计算平均动脉压（1/3 收缩压+2/3 舒张压）。

1.4 分组方法

根据空腹血糖四分位将研究对象分为四组：Q1：<5.00 mmol/L、Q2：5.00~<5.40 mmol/L、Q3：5.40~<5.81 mmol/L、Q4：≥5.81 mmol/L。

1.5 相关定义及诊断标准

根据《中国高血压防治指南（2018 年修订版）》[22]；高血压定义为在未使用降压药的情况下,收缩压≥140mmHg 和或舒张压≥90mmHg,或有高血压病史或服用降压药。高脂血症参照《中国成人血脂异常防治指南》，符合下列任何一项 即定义为高脂血症：①总胆固醇＞5.72 mmol/L；②三酰甘油＞1.70 mmol/L；③HDL-C＜0.91 mmol/L；④LDL-C＞3.64 mmol/L。体质量指数（body mass index,BMI):BMI=体重（kg)/身高^2（m^2）；吸烟定义为近一年平均每天至少吸一支烟，饮酒定义为近一年平均每日饮白酒（酒精含量≥50%）100mL，持续时间≥1 年；体育锻炼定义为锻炼次数≥3 次/周，持续时间≥30 min/次。

1.6 统计学方法

数据由各医院经过统一培训的专业人员录入，并由开滦总医院进行汇总上传 Oracle 数据库。采用 SAS9.4 软件进行统计分析。符合正态分布的计量资料用均数±标准差($\bar{X} \pm S$)表示，

组间比较采用多样本方差分析，用 Scheffe 法进行两两多重比较。功率车二级负荷试验前后的资料采用配对样本 t 检验进行比较；非正态分布的计量资料用中位数（P25,P75）表示，组间比较采用 Kruskal-Wallis 秩和检验，功率车二级负荷试验前后的资料比较采用配对秩和检验；计数资料用例（%）表示,组间比较采用 χ^2 检验。P<0.05 为差异有统计学意义。

以功率车二级负荷试验前后 baPWV 的差值为因变量，四分位的血糖分组为自变量，采用广义线性回归模型评估不同血糖水平人群在运动前后 baPWV 变化的差异（以第四分位为对照）。敏感性分析：功率车二级负荷试验后测量 baPWV 的时间不一致可能会对 baPWV 的变化产生影响，将间隔测量时间>26.28 min(95%分位)观察对象去除后重复广义线性分析。考虑到患有高血压及使用降压药，会对 baPWV 差值产生影响，所以分别将患高血压及使用降压药的观察对象去除后重复广义线性分析。以 P<0.05（双侧检验）表示差异有统计学意义。

2 结果

被抽样参加第五次国民体质监测的开滦集团职工共 1200 人，其中参加开滦 2018-2020 年第六次随访体检 1128 人，排除未在功率车二级负荷试验前后各完成一次 baPWV 检测 116 人，空腹血糖资料缺失者 86 人，功率车二级负荷试验数据不完整者 2 人，最终纳入本次统计分析的观察对象 924 例。

2.1 观察对象一般情况比较 观察对象全部为男性，年龄（36.93±7.72）岁。按空腹血糖四分位分组，从 Q1 到 Q4 例数分别为 220、240、230、234 例，空腹血糖水平分别为 4.74(4.50~4.88)、5.20(5.10~5.30)、5.57(5.50~5.69)、6.22(5.99~6.59) mmol/L。其中，空腹血糖水平最高组（Q4）的年龄、腰围、收缩压、舒张压、LDL-C 等高于空腹血糖水平最低组（Q1）（P<0.01）。高血压、高脂血症、使用降压药比例也高于其余三组（P<0.01）。见表 1。

表 1 观察对象一般情况

Table1 The general information of observation object

变量	总人群(n=924)	Q1(n=220)	Q2(n=240)	Q3（n=230）	Q4（n=234）	$H/F/\chi^2$ 值	P 值
年龄(岁)	36.93±7.72	34.90±7.84	35.42±7.42	37.19±7.22[a]	40.14±7.34[abc]	23.26	<0.01
体重(kg)	76.26±12.32	75.51±11.94	76.05±12.47	76.10±13.08	77.33±11.76	0.90	0.44
BMI(kg/m^2)	26.29±3.85	25.93±3.80	26.08±3.83	26.31±4.21	26.83±3.50	2.42	0.06
腰围(cm)	89.66±9.68	89.18±9.46	88.91±9.68	89.36±10.43	91.16±9.02	2.61	0.05
收缩压(mmHg)	134.15±13.75	133.02±12.38	131.81±14.9[illegible]	134.77±13.45	137.00±13.53[ab]	6.42	<0.01
舒张压(mmHg)	85.34±11.97	83.65±12.15	83.94±11.82	85.42±12.95	88.29±10.35[ab]	7.45	<0.01
空腹血糖（mmol/L）	5.40(5.00,5.82)	4.74(4.50,4.88)	5.20(5.10,5.[illegible]0)[a]	5.57(5.50,5.69)[ab]	6.22(5.99,6.59)[abc]	374.54	<0.01

Hs-CRP(mg/L)	0.24(0.01,1.40)	1.19(0.30,2.60)	0.25(0.01,1.[illegible]0)^{a}	0.16(0.01,1.10)^{a}	0.11(0.01,0.36)^{ab}	115.97	<0.01
三酰甘油(mmol/L)	1.23(0.83,1.95)	1.00(0.75,1.59)	1.19(0.80,1.[illegible]4)	1.32(0.84,2.12)^{a}	1.34(1.00,2.13)^{a}	23.33	<0.01
总胆固醇(mmol/L)	4.79±1.10	4.55±0.96	4.64±1.00^{c}	4.99±1.32^{ab}	4.96±1.03^{ab}	9.52	<0.01
HDL-C(mmol/L)	1.40±0.35	1.45±0.40	1.42±0.37	1.38±0.33	1.35±0.30^{a}	4.58	<0.01
LDL-C(mmol/L)	2.81±0.82	2.68±0.76	2.76±0.71^{d}	2.81±0.71	2.98±1.05^{ab}	5.22	<0.01
高血压[例(%)]	318(34.42)	59(26.82)	62(25.83)	80(34.78)	117(50.00)^{abc}	38.65	<0.01
高脂血症[例(%)]	361(39.07)	49(22.27)	85(35.42)	105(45.65)	122(52.14)^{abc}	48.39	<0.01
降压药[例(%)]	92(9.96)	11(5.00)	16(6.67)	23(10.00)	42(17.95)^{abc}	25.60	<0.01
饮酒[例(%)]	519(56.17)	117(53.18)	126(52.50)	135(58.70)	141(60.26)	4.29	0.23
吸烟[例(%)]	566(61.26)	143(65.00)	146(60.83)	143(62.17)	134(57.26)	2.97	0.40
体育锻炼[例(%)]	344(37.23)	84(38.18)	87(36.25)	97(42.17)	76(32.48)	4.85	0.18

注：空腹血糖四分位分组:Q1:<5.00；Q2：5.00~<5.40；Q3：5.40~<5.81；Q4：≥5.81 mmol/L；BMI：体质量指数；Hs-CRP：高敏 C 反应蛋白；HDL-C：高密度脂蛋白胆固醇；LDL-C：低密度脂蛋白胆固醇； 与 Q1 组相比，$^{a}P<0.05$; 与 Q2 组相比，$^{b}P<0.05$；与 Q3 组相比，$^{c}P<0.05$。

2.2 不同血糖分组观察对象负荷试验前后 baPWV 资料的比较 观察对象静息 baPWV 为（1375.98±209.61）cm/s，Scheffe 法两两多重比较显示，与 Q1、Q2、Q3 组相比，空腹血糖水平最高组（Q4）静息 baPWV 水平较高（$P<0.05$）。Q1、Q2、Q3、Q4 四分位组人群在功率车二级负荷试验后 baPWV 均下降（$P<0.01$）。较静息 baPWV 相比，不同血糖水平人群功率车二级负荷试验后 baPWV 平均下降 36.0 cm/s。见表 2。

表 2 不同血糖分组观察对象负荷试验前后 baPWV 资料的比较

Table2 Comparison of baPWV data of different blood glucose groups before and after load test

变量	总人群（n=924）	Q1(n=220)	Q2(n=240)	Q3（n=230）	Q4（n=234）	$H/F/\chi^2$ 值	P 值
SBP_1(mmHg)	131.90±15.36	130.29±14.16	130.45±14.91	132.12±16.03	134.69±15.90^{ab}	4.15	<0.01
SBP_2(mmHg)	132.30±14.84	129.74±13.93	131.50±14.81	132.41±14.97	135.44±15.08^{ab}	6.01	<0.01
ΔSBP(mmHg)	1.00(-5.00,6.00)	0.00(-7.00,6.00)	1.00(-4.00,6.00)	0.00(-5.00,6.00)	1.00(-5.00,7.00)	4.54	0.21
DBP_1(mmHg)	79.09±11.00	77.32±11.01	77.79±10.76	79.35±11.32	81.82±10.43^{ab}	8.04	<0.01
DBP_2(mmHg)	79.38±10.93	77.58±10.83	78.01±10.73	79.40±11.18	82.44±10.39^{abc}	9.62	<0.01
ΔDBP(mmHg)	0.40(-3.30,4.15)	0.55(-3.35,4.20)	0.15(-3.50,4.45)	0.00(-3.30,3.50)	1.00(-3.00,4.80)	1.86	0.60
MAP_1(mmHg)	99.17±12.50	97.23±12.19	98.03±12.24	99.28±13.03	102.04±12.08^{ab}	6.66	<0.01
MAP_2(mmHg)	99.44±11.98	97.57±11.14	98.74±12.14	99.39±12.10	101.97±12.10^{ab}	5.63	<0.01

ΔMAP(mmHg)	0.30(-4.20,5.10)	0.80(-3.70,5.40)	0.30(-3.80,5.50)	-0.05(-4.70,4.30)	-0.15(-4.50,4.90)	1.70	0.64
HR_1(次/min)	80.15±12.46	79.49±11.99	78.82±12.32	81.07±12.16	81.24±12.20	2.14	0.09
HR_2(次/min)	85.62±13.45*	85.13±13.19*	84.91±14.24*	85.29±12.35*	87.12±13.89	1.34	0.26
ΔHR(次/min)	5.00(0.00,10.00)	6.00(0.00,11.00)	5.00(0.00,11.00)	4.00(-1.00,8.00)	5.00(0.00,11.00)	5.29	0.15
$baPWV_1$(cm/s)	1375.98±209.61	1351.63±198.92	1345.50±204.86	1384.63±216.83	1421.65±209.58^{abc}	6.63	<0.01
$baPWV_2$(cm/s)	1342.24±208.82*	1309.95±194.19*	1312.10±208.65*	1343.84±203.35*	1401.92±215.65^{abc*}	10.08	<0.01
ΔbaPWV (cm/s)	-36.00 (-87.00,24.00)	-45.50(-93.00,12.50)	-36.50(-85.00,19.50)	-39.50(-95.00,18.00)	-23.00(-77.00,35.00)	7.51	0.06
MET	12.16±2.55	12.42±2.78	12.21±2.26	12.22±2.78	11.79±2.33	2.49	0.06
VO_2max (ml/kg/min)	42.56±8.91	43.50±9.71	42.73±7.89	42.78±9.74	41.29±8.14	2.49	0.06
Peak heart rate(次/min)	139.35±14.65	139.40±14.90	139.25±15.62	140.14±13.69	138.61±14.33	0.43	0.73
Time(min)	7.13(4.94,11.16)	7.51(5.41,11.37)	7.38(4.92,12.61)	7.03(5.00,11.15)	6.67(4.73,9.55)	8.22	0.06

注：空腹血糖四分位分组:Q1:<5.00；Q2：5.00~<5.40；Q3：5.40~<5.81；Q4：≥5.81 mmol/L；SBP1：功率车二级负荷试验前收缩压;DBP1：功率车二级负荷试验前舒张压;MAP1:功率车二级负荷试验前中心动脉压;HR1:功率车二级负荷试验前心率；$baPWV_1$:功率车二级负荷试验前臂踝脉搏波速度；SBP_2：功率车二级负荷试验后收缩压;MAP_2：功率车二级负荷试验后中心动脉压;HR_2：功率车二级负荷试验后心率;$baPWV_2$：功率车二级负荷试验后臂踝脉搏波速度；ΔbaPWV：试验后与试验前臂踝脉搏波速度的差值；ΔSBP:试验后与试验前收缩压的差值；ΔMAP:试验后与试验前中心动脉压的差值；ΔHR:试验后与试验前心率的差值；MET:代谢当量;VO2max：最大摄氧量；Peak heart rate：峰值心率;Time：间隔测量时间，功率车二级负荷试验结束至第二次测量 baPWV 的时间差；与 Q1 组相比，$^{a}P<0.05$；与 Q2 组相比，$^{b}P<0.05$； 与 Q3 组相比，$^{c}P<0.05$；*：与功率车二级负荷试验前相比，$P<0.01$。

2.3 血糖水平对负荷试验前后 baPWV 变化影响的广义线性模型分析结果 模型 1 校正静息 baPWV，模型 2 在模型 1 的基础上校正年龄、BMI、腰围、Hs-CRP、吸烟、饮酒、体育锻炼，模型 3 进一步校正高血压+未使用降压药、高血压+降压药、高脂血症、峰值心率、ΔHR、ΔMAP、间隔测量时间相关混杂因素后，与 Q4 组相比，Q1、Q2、Q3 组 baPWV 分别变化 -18.96[95%CI:-36.96,-0.96] cm/s,-12.37[95%CI:-29.35,4.60] cm/s,-15.23[95%CI:-31.95,1.49] cm/s。见表 3。

表 3 血糖水平对负荷试验前后 baPWV 变化影响的广义线性模型分析结果（n=924

Table3 Results of generalized linear model analysis of the effect of blood glucose level on baPWV before and after load test

模型	参数	B值	SE	t值	P值	95%CI
1	Q4	Ref				
	Q1	-30.10	8.81	6.66	<0.01	(-47.39,-12.82)
	Q2	-22.54	8.63	-2.61	0.01	(-39.48,-5.60)

	Q3	-25.38	8.67	-2.93	<0.01	(-42.39, -8.37)
	baPWV$_1$	-0.12	0.01	-7.84	<0.01	(-0.15, -0.09)
2	Q4	Ref				
	Q1	-18.82	9.11	-2.07	0.04	(-36.69, -0.94)
	Q2	-12.71	8.68	-1.47	0.14	(-29.74, 4.32)
	Q3	-19.58	8.60	-2.28	0.02	(-36.45, -2.71)
	baPWV$_1$	-0.16	0.02	-9.96	<0.01	(-0.19, -0.13)
	年龄	2.51	0.43	5.82	<0.01	(1.66, 3.36)
	BMI	4.03	1.66	2.43	0.02	(0.77, 7.28)
	腰围	-0.83	0.66	-1.24	0.21	(-2.13, 0.48)
	Hs-CRP	0.89	1.13	0.79	0.43	(-1.33, 3.11)
	吸烟	-5.70	6.30	-0.91	0.36	(-18.06, 6.65)
	饮酒	9.14	6.18	1.48	0.14	(-2.98, 21.26)
	体育锻炼	-7.61	6.32	-1.20	0.23	(-20.01, 4.80)
3	Q4	Ref				
	Q1	-18.96	9.17	-2.07	0.04	(-36.96, -0.96)
	Q2	-12.37	8.65	-1.43	0.15	(-29.35, 4.60)
	Q3	-15.23	8.52	-1.79	0.07	(-31.95, 1.49)
	baPWV$_1$	-0.16	0.02	-9.73	<0.01	(-0.19, -0.13)
	年龄	2.35	0.49	4.77	<0.01	(1.38, 3.32)
	BMI	4.24	1.65	2.57	0.01	(1.00, 7.48)
	腰围	-0.97	0.66	-1.46	0.14	(-2.26, 0.33)
	Hs-CRP	0.92	1.12	0.82	0.41	(-1.28, 3.12)
	吸烟	-3.36	6.24	-0.54	0.59	(-15.60, 8.89)
	饮酒	8.69	6.10	1.43	0.15	(-3.27, 20.65)
	体育锻炼	-8.46	6.28	-1.35	0.18	(-20.78, 3.86)
	正常血压					
	高血压+未用降压药	22.30	7.73	2.88	<0.01	(7.12, 37.78)
	高血压+降压药	9.68	11.22	0.86	0.39	(-12.34, 31.71)
	高脂血症	-4.60	6.53	-0.70	0.48	(-17.42, 8.22)
	Peak heart rate	-0.46	0.24	-1.96	0.05	(-0.93, 0.00)
	ΔHR	1.92	0.38	5.01	<0.01	(1.17, 2.67)
	ΔMAP	0.28	0.40	0.71	0.48	(-0.50, 1.07)
	Time	0.78	0.39	2.01	0.04	(0.02, 1.54)

注：空腹血糖四分位分组:Q1:<5.00；Q2：5.00~<5.40；Q3：5.40~<5.81；Q4：≥5.81 mmol/L；模型 1 校正 baPWV$_1$（功率车二级负荷试验前臂踝脉搏波速度）;模型 2 在模型 1 的基础上校正年龄,BMI（体质量指数）,腰围,Hs-CRP（高敏 C 反应蛋白）,吸烟,饮酒,体育锻炼；模型 3 在模型 2 的基础上进一步校正高血压+未使用降压药,高血压+降压药,高脂血症,Peak heart rate（峰值心率）,ΔHR（试验后与试验前心率的差值）, ΔMAP（试验后与试验前中心动脉压的差值）,Time（间隔测量时间，功率车二级负荷试验结束至第二次测量 baPWV 的时间差）。

2.4 敏感性分析 分别排除高血压(n=318)、使用降压药(n=92)以及间隔测量时间在 95%分位(＞26.28min，n=47）以上的观察对象后重复广义线性分析，功率车二级负荷试验后不同血糖分组

baPWV 变化与主要分析结果相似，但差异无统计学意义（见表 4~6）。

表 4 血糖水平对负荷试验前后 baPWV 变化影响的广义线性模型分析结果(排除间隔测量时间>26.28min 后，n=877）

Table4 Results of generalized linear model analysis of the effect of blood glucoselevel on baPWV before and after load test(Exclude interval measurement time>26.28min, n=877)

参数	*B* 值	*SE*	*t* 值	*P* 值	95%*CI*
Q4	Ref				
Q1	-15.15	9.38	-1.60	0.11	(-33.75, 3.45)
Q2	-11.35	8.91	-1.27	0.20	(-28.84, 6.14)
Q3	-11.42	8.72	-1.31	0.19	(-28.54, 5.69)

注：空腹血糖四分位分组:Q1:<5.00；Q2：5.00~<5.40；Q3：5.40~<5.81；Q4：≥5.81 mmol/L；将间隔测量时间>26.28min(95%分位)（n=47）观察对象排除后重复广义线性分析，校正 $baPWV_1$（功率车二级负荷试验前臂踝脉搏波速度）,年龄,BMI（体质量指数）,腰围,Hs-CRP（高敏 C 反应蛋白）,吸烟,饮酒,体育锻炼,高血压,高脂血症.Peak heart rate（峰值心率）,ΔHR（试验后与试验前心率的差值）,ΔMAP（试验后与试验前中心动脉压的差值）,Time（间隔测量时间，功率车二级负荷试验结束至第二次测量 baPWV 的时间差）。

表 5 血糖水平对负荷试验前后 baPWV 变化影响的广义线性模型分析结果（排除高血压患者后，n=606）

Table5 Results of generalized linear model analysis of the effect of blood glucose level on baPWV before and after load test(Exclude patients with hypersion, n=606)

参数	*B* 值	*SE*	*t* 值	*P* 值	95%*CI*
Q4	Ref				
Q1	-13.97	11.39	-1.23	0.22	(-36.34, 8.41)
Q2	-12.30	10.80	-1.14	0.26	(-33.51, 8.92)
Q3	-11.94	11.06	-1.08	0.28	(-33.67, 9.78)

注：空腹血糖四分位分组:Q1:<5.00；Q2：5.00~<5.40；Q3：5.40~<5.81；Q4：≥5.81 mmol/L；排除患高血压个体（n=318）重复广义线性分析，校正 $baPWV_1$（功率车二级负荷试验前臂踝脉搏波速度）,年龄,BMI（体质量指数）,腰围,Hs-CRP（高敏 C 反应蛋白）,吸烟,饮酒,体育锻炼,高血压,高脂血症.Peak heart rate（峰值心率）,ΔHR（试验后与试验前心率的差值）,ΔMAP（试验后与试验前中心动脉压的差值）,Time（间隔测量时间，功率车二级负荷试验结束至第二次测量 baPWV 的时间差）。

表 6 血糖水平对负荷试验前后 baPWV 变化影响的广义线性模型分析结果（排除服用降压药后，n=832）

Table6 Results of generalized linear model analysis of the effect of blood glucose level on baPWV before and after load test(Exclude patients taking antihypertensive drugs, n=832)

参数	*B* 值	*SE*	*t* 值	*P* 值	95%*CI*
Q4	Ref				

Q1	-16.66	9.36	-1.78	0.08	(-35.03,1.72)
Q2	-11.98	8.92	-1.34	0.18	(-29.50,5.53)
Q3	-16.27	8.92	-1.82	0.07	(-33.79,1.25)

注：空腹血糖四分位分组:Q1:<5.00；Q2：5.00~<5.40；Q3：5.40~<5.81；Q4：≥5.81 mmol/L；排除服用降压药的个体（*n*=92）重复广义线性分析，校正 $baPWV_1$（功率车二级负荷试验前臂踝脉搏波速度）,年龄,BMI（体质量指数）,腰围,Hs-CRP（高敏C 反应蛋白）,吸烟,饮酒,体育锻炼,高血压,高脂血症.Peak heart rate（峰值心率）,ΔHR（试验后与试验前心率的差值）,ΔMAP（试验后与试验前中心动脉压的差值）,Time（间隔测量时间，功率车二级负荷试验结束至第二次测量 baPWV 的时间差）。

3 讨论

本研究的重要发现是，有氧运动确实能够改善动脉僵硬的程度，但高血糖减弱了有氧运动改善动脉僵硬度的作用，而且这种不利的作用独立于 BMI、高血压等传统心血管病危险因素。

既往关于有氧运动对动脉僵硬度影响的研究表明，在健康人群中，有氧运动可以显著改善外周动脉僵硬度[23]。Magalhães 等[24]的一项研究结果显示，有氧运动可以降低糖尿病人群外周动脉僵硬度（carotid distal pulse wave velocity, cdPWV），另一项对 11 名平均年龄 21 岁的青年健康男性研究中显示 30 min 有氧运动后外周动脉僵硬度(Leg pulse wave velocity, LPWV)下降[14]。本研究发现在不同血糖水平青年男性人群（36.93±7.72 岁）中，功率车二级负荷试验后即时测得的 baPWV 下降，较静息水平平均下降了 36 cm/s。这一结果与 Kingwell 等[25]的研究结果类似，他们发现平均年龄 24 岁的健康男性完成 30 min 功率车负荷运动后即时动脉僵硬度下降 80 cm/s。

本研究中，观察到不同血糖水平人群功率车二级负荷试验后 baPWV 下降幅度存在差异。在校正多种混杂因素后，发现与空腹血糖水平最高组（Q4）相比，空腹血糖水平最低组（Q1）baPWV 多下降了 18.96cm/s。与本研究结果不同，一项随机交叉试验研究发现有氧运动对高血糖人群（*n*=24）动脉僵硬度无明显改善[15]。而 Cooke 等[26]的研究中发现，有氧运动对 2 型糖尿病患者（*n*=66）与非 2 型糖尿病患者（*n*=61）动脉僵硬度的即时影响不同，与非 2 型糖尿病患者相比，2 型糖尿病患者完成 15min 竭力运动后即时动脉僵硬度增加 1.6m/s。由于上述研究中运动方式更剧烈，样本量相对过小。且使用颈股脉搏波传导速度(carotid and femoral Pulse Wave Velocity，cfPWV)作为动脉僵硬度的测量指标，cfPWV 主要用于评价中心动脉僵硬度。而有关研究表明有氧运动对不同节段动脉僵硬度影响不一致[27]，运动后即时，中央动脉段的僵硬度相对于静息水平增加，而四肢动脉段的僵硬度会降低，可能由于以上原因导致与本研究的结果不一致。

虽然本研究发现不同血糖水平人群功率车二级负荷试验后即时 baPWV 下降幅度有差异。相对较高血糖水平人群，低血糖水平人群下降幅度更为明显，但本研究是观察性研究无法探究具体机制。根据以往的研究发现，可能的机制有：长期处于高血糖状态，导致晚期糖基化终末产物的形成，葡萄糖与动脉内的胶原蛋白形成交联，改变弹性蛋白和胶原蛋白之间的重要平衡。高血糖导致蛋白激酶 C 的激活，从而导致活性氧的产生和炎症，改变血管壁的结构和功能的完整性[28, 29]。由于高血糖水平人群动脉壁固有属性的变化，有氧运动对动脉僵硬度的积极作用弱化，导致有氧运动在不同血糖水平人群作用不一致。此外，考虑到短时间的功率车二级负荷试验难以对血管结构造成影响，将差异主要归因于功能变化。短时间的有氧运动提高了血流速

度，产生一定剪切应力诱导血管内皮细胞释放包括前列腺素、一氧化氮及其他血管舒张因子，引起血管平滑肌舒张促进血管功能改善，从而达到改善动脉僵硬度的效果[30-32]。而高血糖人群可能伴血管内皮细胞功能障碍、神经系统活性失调等动脉功能受损表现[33]，故而推测这是高血糖人群有氧运动后 baPWV 改善不显著的原因。

改善生活方式和防控多种危险因素仍是心血管病的一级预防措施，各种指南均将有氧运动作为健康生活方式的主要推荐。系统回顾和荟萃分析表明，需要长期有氧运动来降低成年人动脉僵硬度[23]，但本研究结果显示单次的有氧运动后也可以使外周动脉僵硬度下降。而相关研究表明单次短时间的有氧运动对 baPWV 影响只是功能性而不是结构性的改变结果[23]，这种改变并非持续性的，之后恢复基线水平。由于短时间的有氧运动不能提供足够的刺激来促进动脉结构的变化，但如果能增加有氧运动次数（总时间）有可能使有氧运动对动脉僵硬度的有利作用随着时间的推移而保持，达到血管结构上的有益改变。同时对于高血糖人群而言，可能需要更积极的运动处方来提供足够的刺激以引发动脉结构变化，以弥补高血糖产生的不利影响。因此，对于临床医务人员，要针对不同人群设计不同的运动方案，以改善动脉硬化延缓血管老化。

本研究有一些局限性，人群存在较大的异质性，首先本研究观察对象均为青年男性，这排除了将该研究结果推广到中年人、老年人或女性个体的可能性。其次，血糖值是基于一次空腹血糖测量来确定的，因此容易对血糖状态产生一些错误的分组偏差。最后，由于现场条件限制，本研究只能获得功率车二级负荷试验后一个时间点的单次测量结果，这意味着结果推广会有一些局限性，需要更多关于有氧运动后动脉僵硬度重复测量数据，去进一步探究有氧运动对动脉僵硬的改善是否会持续以及持续多久。

综上所述，单次的有氧运动可以改善动脉僵硬度，运动后即时动脉僵硬度下降，而高血糖减弱有氧运动改善动脉僵硬度的作用。

参考文献

[1]Bull FC, Al-Ansari SS, Biddle S, et al. World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour [J]. Br J Sports Med, 2020, 54(24): 1451-1462.

[2]Zhao D, Liu J, Wang M, et al. Epidemiology of cardiovascular disease in China: current features and implications [J]. Nat Rev Cardiol, 2019, 16(4): 203-212.

[3]Thompson PD, Arena R, Riebe D,et al. ACSM's New Preparticipation Health Screening Recommendations from ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription, Ninth Edition [J]. Current Sports Medicine Reports, 2013,12(4):215-217.

[4]Schulze MB, Hu FB. Primary prevention of diabetes: what can be done and how much can be prevented? [J]. Annu Rev Public Health, 2005, 26: 445-467.

[5]Petersen KS, Blanch N, Keogh JB, et al. Effect of weight loss on pulse wave velocity: systematic review and meta-analysis [J]. Arterioscler Thromb Vasc Biol, 2015, 35(1):

243-252.

[6]Boule´ NG, Haddad E, Kenny GP, et al. Effects of exercise on glycemic control and body mass in type 2 diabetes mellitus a meta-analysis of controlled clinical trials [J]. JAMA, 2001,286(10):1218-1227.

[7]Balducci S, Leonetti F, Mario UD, et al. Is a long-term aerobic plus resistance training program feasible for and effective on metabolic profiles in type 2 diabetic patients? [J]. Diabetes Care, 2004,27(3):841-842.

[8]Ashor AW, Lara J, Siervo M, et al. Effects of exercise modalities on arterial stiffness and wave reflection: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. PLoS One, 2014, 9(10): e110034.

[9]Schuler G, Adams V, Goto Y. Role of exercise in the prevention of cardiovascular disease: results, mechanisms, and new perspectives [J]. Eur Heart J,2013, 34(24): 1790-1799.

[10]Miyachi M. Effects of resistance training on arterial stiffness: a meta-analysis [J]. Br J Sports Med, 2013, 47(6): 393-396.

[11]Monahan KD, Tanaka H, Dinenno FA, et al. Central arterial compliance is associated with age- and habitual exercise–related differences in cardiovagal baroreflex sensitivity [J]. Circulation, 2001,104(14):1627-1632.

[12]Montero D, Roche E, Martinez-Rodriguez A. The impact of aerobic exercise training on arterial stiffness in pre- and hypertensive subjects: a systematic review and meta-analysis [J]. Int J Cardiol, 2014, 173(3): 361-368.

[13]Shibata S, Fujimoto N, Hastings JL, et al. The effect of lifelong exercise frequency on arterial stiffness [J]. J Physiol, 2018, 596(14): 2783-2795.

[14]Kobayashi R, Yoshida S, Okamoto T. Effects of acute aerobic exercise on arterial stiffness before and after glucose ingestion [J]. Int J Sports Med, 2017, 38(1): 12-18.

[15]Way KL, Lee AS, Twigg SM, et al. The effect of acute aerobic exercise on central arterial stiffness, wave reflections, and hemodynamics in adults with diabetes: A randomized cross-over design [J]. J Sport Health Sci, 2021, 10(4): 499-506.

[16] 韩旭, 刘倩, 马一涵, 等. 非糖尿病人群空腹血糖水平对动脉僵硬度进展的影响[J]. 中

华高血压杂志, 2021, 29(01): 41-47.

[17]Fu S, Chen W, Luo L, et al. Roles of fasting and postprandial blood glucose in the effect of type 2 diabetes on central arterial stiffness: a 5-year prospective community-based analysis [J]. Diabetol Metab Syndr, 2017, 9: 33.

[18]Shin JY , Lee HR, Lee DC. Increased arterial stiffness in healthy subjects with high-normal glucose levels and in subjects with pre-diabetes [J]. Cardiovasc Diabetol, 2011, 10: 30.

[19]Loehr LR, Meyer ML, Poon AK, et al. Prediabetes and diabetes are associated with arterial stiffness in older adults: The ARIC Study [J]. Am J Hypertens, 2016, 29(9): 1038-1045.

[20]Wang J, Liu L, Zhou Y, et al. Increased fasting glucose and the prevalence of arterial stiffness: a cross-sectional study in Chinese adults [J]. Neurological Research, 2014, 36(5): 427-433.

[21]Zheng M, Zhang X, Chen S, et al. Arterial stiffness preceding diabetes: a longitudinal study [J]. Circ Res, 2020, 127(12): 1491-1498.

[22]中国高血压防治指南(2018 年修订版)[J]. 中国心血管杂志, 2019, 24(01): 24-56.

[23]Saz-Lara A, Cavero-Redondo I, Alvarez-Bueno C, et al. The acute effect of exercise on arterial stiffness in healthy subjects: a meta-analysis [J]. J Clin Med, 2021, 10(2): 291.

[24]Magalhaes JP, Melo X, Correia IR, et al. Effects of combined training with different intensities on vascular health in patients with type 2 diabetes: a 1-year randomized controlled trial [J]. Cardiovasc Diabetol, 2019, 18(1): 34.

[25]Kingwell BA, Berry KL, Cameron JD, et al. Arterial compliance increases after moderate-intensity cycling [J]. Am J Physiol, 1997, 273(5): H2186-H2191.

[26]Cooke AB, Dasgupta K, Spronck B, et al. Adults with type 2 diabetes mellitus exhibit a greater exercise-induced increase in arterial stiffness and vessel hemodynamics [J]. Hypertension, 2020, 75(6): 1565-1573.

[27]Mutter AF, Cooke AB, Saleh O, et al. A systematic review on the effect of acute aerobic exercise on arterial stiffness reveals a differential response in the upper and lower arterial segments [J]. Hypertens Res, 2017, 40(2): 146-172.

[28]Aronson D. Cross-linking of glycated collagen in the pathogenesis of arterial and

myocardial stiffening of aging and diabetes [J]. J Hypertens, 2003, 21(1): 3-12.
[29]Mazzone T, Chait A, Plutzky J. Cardiovascular disease risk in type 2 diabetes mellitus: insights from mechanistic studies [J]. The Lancet, 2008, 371(9626): 1800-1809.
[30]Higashi Y, Yoshizumi M. Exercise and endothelial function: role of endothelium-derived nitric oxide and oxidative stress in healthy subjects and hypertensive patients [J]. Pharmacol Ther, 2004, 102(1): 87-96.
[31]Yang Z, Wang JM, Chen L, et al. Acute exercise-induced nitric oxide production contributes to upregulation of circulating endothelial progenitor cells in healthy subjects [J]. J Hum Hypertens, 2007, 21(6): 452-60.
[32]Kozakova M, Palombo C. Vascular ageing and aerobic exercise [J]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(20):10666.
[33]Lacolley P, Regnault V, Segers P, et al. Vascular smooth muscle cells and arterial stiffening: relevance in development, aging, and disease [J]. Physiol Rev, 2017, 97(4): 1555-1617.